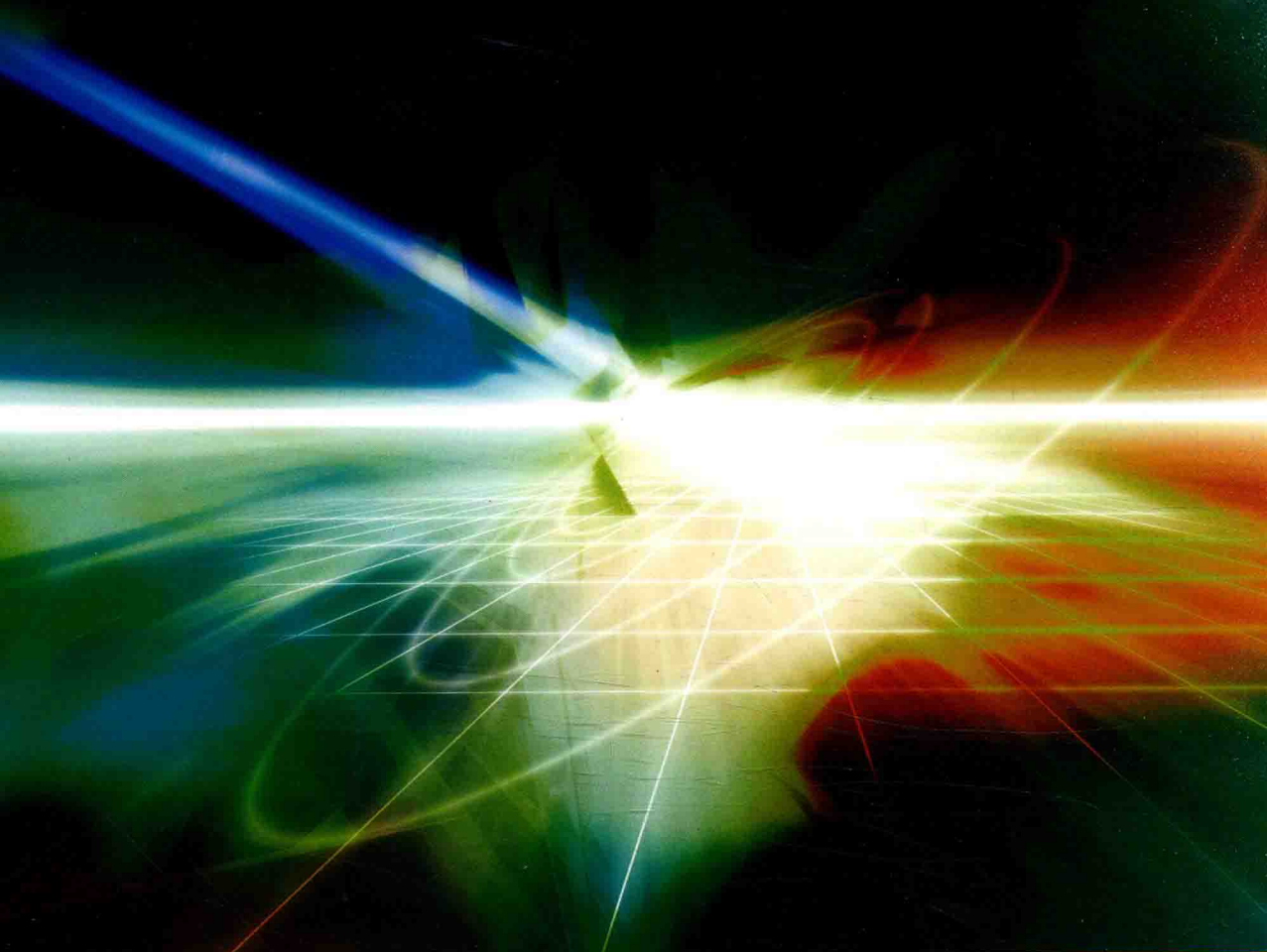




大学物理实验

主 编 刘福平
副主编 华中文
主 审 史 彭



科学出版社

大学物理实验

主 编 刘福平
副主编 华中文
主 审 史 彭



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为适应当前实验教学改革的要求,根据原国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,经过几年教学实践并根据广大师生的意见和建议而编写的。全书共4章,第1~2章对误差理论、不确定度和数据处理及基本实验知识进行详细介绍;第3章是预备性、基础性实验;第4章是提高、综合和设计性实验。书后附录包括了常用测量仪器及量具误差限、基本物理常数等。

本书可作为各类高等院校工科专业和理科非物理类专业本科或专科生的物理实验教材,也可作为实验技术人员、相关课程教师及其他科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 刘福平主编. —北京: 科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-051772-2

I. ①大… II. ①刘… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 027499 号

责任编辑: 胡云志 任俊红 焦惠丛 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 华路天然工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年2月第一次印刷 印张: 15

字数: 390 000

定价: 34.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是为适应当前实验教学改革的要求,根据原国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,在由科学出版社出版凌亚文、华中文等同志编写的《大学物理实验》基础上,经过几年教学实践并根据广大师生的意见和建议而编写的。全书在取材和编写上都有改革,力求理论完整,实验知识系统化,保证学生通过实验课能较好地掌握和运用理论知识。

本书第1~2章采用较多的篇幅对误差理论及数据处理的基础知识进行了详细介绍,采用前细后粗的引导方式,使学生逐步掌握数据处理的基本方法,还能够自主发挥。在实验结果的质量评价方面,采用了“不确定度”的概念及相关理论,力求使学生掌握这种国际标准评价方法。通过一些实验项目的举例对测量误差的估计、完整的数据记录和处理、误差分析方法等方面进行了介绍并提出具体要求,以培养学生严谨的工作态度。

第3章是预备性、基础性实验。这类实验对实验项目的目的、实验原理和实验仪器做了简明扼要的阐述,给出了实验思路和方法。通过这类实验项目的训练,学生能正确使用基本仪器,掌握基本物理量的测量方法和基本实验操作技能,加深对物理基础理论知识的理解。

第4章是提高、综合和设计性实验。这类实验过程要求非常明确,学生可按实验原理、实验步骤、实验方法及参考仪器的合理选择来完成。通过该类实验可提高学生独立分析问题和解决问题的能力,同时也有助于学生综合实践能力的提高。

本书以实验系统知识、实验课程的特点和要求、实验方法和技术、相关仪器设备以及可以解决的问题为主线,所有的实验课题都为获得系统实验知识服务。教材的总体结构打破了物理实验教材按照物理学理论知识体系编排的传统方法,这样的安排有利于学生掌握系统实验知识,以及对后续其他实验及实践性课程的学习。撰写风格方面尽量减少实验原理中的物理理论、公式的推导,把实验原理介绍的重点放在实验方法和数据处理方法等实验知识上。仪器介绍方面突出仪器所用基本原理、一般使用方法及可应用领域等内容,给学生留一个思考的空间。

本书由刘福平老师担任主编,华中文老师担任副主编,史彭老师担任主审,郝丹辉、杨洁、魏瑞丽、张蕾、白冰及陈思敏老师参编,在编写过程中得到了西安建筑科技大学华清学院和西安建筑科技大学理学院物理系的大力支持,以及科学出版社工作人员特别是任俊红编辑的支持与帮助,在此谨致以深切的谢意!

对书中存在的缺点和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2016年5月1日

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 测量误差、不确定度与数据处理	5
1.1 测量与误差	5
1.1.1 测量及其分类	5
1.1.2 真值与误差	6
1.1.3 误差的分类	6
1.1.4 随机误差的分布规律与特性	8
1.1.5 测量的精密度、正确度和准确度	11
1.2 有效数字及其运算法则	12
1.2.1 有效数字的基本概念	12
1.2.2 直接测量的读数原则	12
1.2.3 有效数字运算规则	13
1.2.4 测量结果数字取舍规则	14
1.3 不确定度评定与测量结果的表示	15
1.3.1 测量不确定度的引入	15
1.3.2 测量不确定度的基本概念	15
1.3.3 用测量不确定度评定测量结果的简化计算方法	16
1.3.4 不确定度与误差的关系	22
1.4 实验数据处理方法	22
1.4.1 列表法处理实验数据	23
1.4.2 图示法和图解法处理实验数据	23
1.4.3 逐差法处理实验数据	26
1.4.4 最小二乘法	27
第 2 章 基本实验知识	31
2.1 基本测量方法	31
2.1.1 直读法	31
2.1.2 放大法	32
2.1.3 补偿法	33
2.1.4 模拟法	34
2.1.5 替代法	35
2.1.6 转换法	35
2.1.7 平衡法	36

2.2 基本测量仪器及使用	36
2.2.1 基本力学测量仪器	36
2.2.2 基本热学测量仪器	48
2.2.3 基本电学测量仪器	49
2.2.4 微机与微型计算机在物理实验中的应用	59
2.2.5 基本光学测量仪器	61
2.3 仪器的基本调整技术及操作规程	64
第3章 基本训练实验	68
3.1 基本测量	68
3.2 光杠杆放大法测量微小长度的变化	74
3.3 弦振动实验	81
3.4 电阻元件伏安特性的测量	85
3.5 扭摆法测量物体的转动惯量	89
3.6 气垫导轨上测量速度和加速度	94
3.7 碰撞的研究	101
3.8 用旋光仪测旋光性溶液的浓度	104
3.9 单臂电桥测电阻	110
3.10 高电势电位差计的应用	119
3.11 分光计的使用	124
3.12 用稳恒电流场模拟静电场	133
3.13 双踪示波器的使用	140
3.14 用稳态法测不良导体的导热系数	153
3.15 迈克耳孙干涉实验	155
3.16 衍射光栅特性的研究	163
3.17 双臂电桥测低值电阻	168
3.18 等厚干涉实验	172
3.19 空气中声速的测量	181
3.20 霍尔效应实验	188
3.21 落球法测定液体黏滞系数	194
第4章 提高、综合和设计性实验	199
4.1 硅光电池特性研究	199
4.2 CCD 光栅光谱仪	205
4.3 双棱镜测钠光波长	214
4.4 激光再现的全息照相	219
4.5 白光再现全息照相	223
附录 常用数据	226
1.1 常用测量仪器、量具误差限	226
1.2 电路灵敏度误差限的计算方法	229
1.3 常用表	229

绪 论

一、物理实验的地位和作用

“物理学是以实验为本的科学”，这一精辟论述出自诺贝尔物理学奖获得者、著名理论物理学家杨振宁教授的一则题词。这是物理学界的共识，无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证都要靠实验。麦克斯韦提出的电磁理论(他预言了电磁波的存在)只有当赫兹做出电磁学实验后才被人们公认；杨振宁、李政道在 1956 年提出基本粒子在“弱相互作用下的宇称不守恒”的理论，只有当实验物理学家吴健雄用实验验证后，才被同行学者承认，从而才能获得诺贝尔奖。人们掌握理论的目的是在于应用它来指导生产实际，促进科学进步，推动社会前进。当理论在实际中应用时，仍必须通过实验，实验是理论和应用的桥梁。任何一门科学的发展都离不开实验，这就使实验物理课有了充实的教学内容。物理实验是主要基础课程之一。

物理实验的重要性，不仅表现在通过实验发现物理定律，而且物理学中的每一项重要突破都与实验密切相关，物理学史表明，经典物理学的形成，是伽利略、牛顿、麦克斯韦等通过观察自然现象，反复实验，运用抽象思维的方法总结出来的。近代物理的发展，是在某些实验的基础上提出假设，例如，普朗克根据黑体辐射提出“能量子假设”，再经过大量的实验证实、假设才成为科学理论。实践证明物理实验是物理学发展的动力。在物理学发展的进程中，物理实验和物理理论始终是相互促进、相互制约、相得益彰的，没有理论指导的实验是盲目的，实验必须经过总结抽象上升为理论，才有其存在的价值。理论靠实验来检验，同时理论上的需要又促进实验的发展。1752 年富兰克林利用风筝把天空的电引入室内，进行室内雷鸣闪电实验，证实了雷电与电火花放电有同样的本质，进而找出了雷电的成因，并且在此基础上发明了避雷针。这个简单的实验事实，足以说明物理实验在物理学发展中所起的重要作用。

物理学发展到当今时代，与实验的关系就更为密切，而且在许多边缘学科的建立过程中，物理实验也起了重要的桥梁作用，物理实验在探索和研究新科技领域，以及推动其他自然科学和工程技术的发展中，起到的重要作用是不可低估的。自然科学迅速发展，新的学科分支层出不穷，但基础学科就是数学和物理两门。物理实验是研究物理测量方法与实验方法的科学，物理实验的特点在于它具有普遍性——力、热、光、电都有；具有基本性——它是其他一切实验的基础；同时它还有通用性——适用于一切领域，把高、精、尖的复杂实验分解成为“零件”，绝大部分是常见的物理实验，在工程技术领域中，研制、生产、加工、运输等都普遍涉及物理量的测量及物理运动状态的控制，这正是成熟的物理实验的推广和应用。现代高科技的发展，其设计思想、方法和技术也来源于物理实验，因此，物理实验是自然科学、工程技术和高科技发展的基础，科学技术的发展离不开物理实验。

在物理学发展过程中，人类积累了丰富的实验方法，这就使物理实验课有了充实的教学内容。学生从中可以学到许多基本实验方法和实验技能，观察到许多生动的自然现象，并在

客观实际的事物与抽象模型化的物理理论之间架起了桥梁,使自己在理论应用于实践的过程中,加深对理论的理解,提高分析和解决实际问题的能力。因此,在大学学习期间要做到理论课与实验课并重,掌握书本知识与提高科学实验的实践能力并重。

1976年12月10日,因发现J粒子而获得诺贝尔物理学奖的丁肇中教授在斯德哥尔摩的颁奖仪式上曾语重心长地讲过这样一段震撼人心的话:“我是在旧中国长大的,因此想借这个机会向发展中国家的青年强调实验工作的重要性。中国有一句古话‘劳心者治人,劳力者治于人’,这种落后的思想,对发展中国家的青年们有很大的害处,由于这种思想,很多发展中国家的学生都倾向于理论研究,而避免实验工作,事实上,自然科学理论不能离开实验的基础,特别是物理学是从实验中产生的,我希望由于我这次获奖,能够唤起在发展中国家的学生们的兴趣,而注意实验工作的重要性。”丁肇中教授的这段话值得大家认真体会。

二、物理实验课的目的和任务

物理实验是对高等学校理工科类学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,也是理工科学生进入大学后受到系统的实验思想和实验技能训练的开端,通过本课程的学习,不仅可以加深对物理理论的理解,更重要的是使学生获得基本的实验知识,掌握一定的实验方法和技能,提高创新思维能力,为进一步学习后续课程和日后的工作打好基础。理工科学生毕业后绝大部分将不同程度地从事科研、工程技术和新技术应用开发等与实验有关的工作,培养良好的实验素质有重要的意义。本课程的教学目的和任务是:

(1) 通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验的基本知识、基本方法,掌握物理实验的基本技能。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力。包括:①能够通过阅读实验教材或查阅参考资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备;②能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;③能够运用物理学理论对实验对象进行初步分析判断,加深对物理学原理的理解;④能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,评价实验结果,撰写合格的实验报告;⑤能够按科学实验的主要过程独立完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验素质。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动研究的探索精神以及遵守纪律、团结协作、爱护公共财物的优良品德。

三、物理实验课的主要教学环节

为达到物理实验课的目的和任务,学生应重视物理实验教学的三个重要环节。

1. 实验前的预习

为了在规定时间内,高质量地完成实验课的任务,学生应当做好实验前的预习。预习时,主要阅读实验教材,了解实验目的,搞清楚实验内容,要测量什么量,使用什么方法,实验的理论依据是什么,使用什么仪器,其仪器的性能是什么,如何使用,操作要点及实验中特别要注意的问题等。在此基础上,写好预习实验报告(包括实验名称、目的、仪器、原理、内容等)以及为将要测的实验数据在原始数据记录纸上适当画好表格。有时实验不要求另写正式报告的,预习报告就是正式报告,要特别认真撰写(按以下关于“实验报告”的要求写)。如

果是课题实验或设计性实验内容,需制订初步实验方案,提出对仪器设备的要求。

只有在充分了解实验内容的基础上,才能在实验操作中有目的地观察实验现象,思考问题,减少操作中的忙乱现象,提高学习的主动性。因此,每次实验前,学生必须完成规定的预习内容。一般情况下,教师要检查学生预习情况,并评定预习成绩,没有预习的学生不得动手实验。

2. 进行实验

学生进入实验室后应遵守实验室规章制度,犹如一个科学工作者那样严格要求自己,井井有条地布置仪器,安全操作,注意细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题。不要期待实验工作始终一帆风顺,尤其是课题实验。在遇到问题时,应看作是学习的良机,冷静地分析和处理,直到修改甚至推翻自己的方案。仪器装置出现故障时,学生应在教师指导下学习排除故障的方法,力求自己动手解决,或留意观看教师是怎样分析判断仪器的毛病、怎样修复仪器的(可能当场修复的仪器)。总之,要把重点放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就以为完成任务。对实验数据要严肃对待,要用钢笔或圆珠笔把测量的原始数据正确地记录在实验课前画好的数据表格中(不允许用铅笔记录原始数据)。读数一定要认真仔细(注意单位和有效数字位数),不要忘记记录有关的环境条件,如温度、压强等。如确实记错了,也不要涂改,可在错误的数字上画一条整齐的直线,在旁边写上正确值,如果整段数据都测错了,则画一个与此段大小相适应的“×”号,在情况允许时,可以简单说明为什么是错误的。记录的错误数据不要用黑圆圈或黑方块涂掉,这样可使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考。如发现数据有疑问,可以重新实验,并对原来数据标上特殊符号以备查考。实验原始数据的优劣,决定着实验工作结果的成败。但是,未重新测量绝不允许修改实验数据,这是一个科学工作者的基本道德素养。我们保留“错误”数据,不毁掉它,是因为“错误”数据有时经过比较后竟是对的。不要用铅笔记录,给自己留有涂抹的余地,也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里,这样容易出错,况且,这已经不是“原始记录”了。

如果两个学生同时做一个实验,既要分工又要协作,各自记录实验数据,共同完成实验任务,并且,原始数据记录上应写上同组者姓名。

实验结束时,将实验数据交教师审阅签字,整理好仪器设备,关好水、电、窗等,方可离开实验室,这些都是一个实验工作者的基本素质,要养成良好的习惯。

3. 撰写实验报告

实验报告是对实验工作的全面总结,是交流经验、推广实验成果的媒介。学会撰写实验报告是培养实验能力的一个方面。写实验报告要用简明扼要的形式将实验结果完整、准确地表达出来,这也是进行科学实验素质培养的必要内容之一。

实验报告要求文字通顺,字迹端正,数据齐全,图表规范,结果表示正确,分析讨论认真。实验报告要求在做完实验一周内独立完成,用学校统一印制的“实验报告”来书写并按按时交报告,因为这样做可以得到事半功倍的效果。

完整的实验报告通常包括以下内容。

实验名称:表示做什么实验。

实验目的：说明为什么做这个实验，做该实验要达到什么目的。

实验仪器：列出主要仪器的名称、型号、规格、精度等。

实验原理：用自己的语言对实验所依据的理论做简要叙述，不要照抄书本。实验原理一般包括：①文字；②测量和计算所依据的主要公式及其简要推导过程，注明公式中各物理量的含义，公式成立所应满足的实验条件等；③画出有关的图（原理图或装置图），如在电磁学、光学实验中，应有相应的电路图或光路图等。

实验内容与步骤：根据实验的过程概括地、条理分明地写明实验所进行的主要内容与关键步骤。

实验数据表格与数据处理：将原始记录数据转记于实验报告纸上（原始记录也应附在报告纸后，以便教师检查），并尽可能用表格的形式列出，正确表示有效数字和单位。作图的还应在专门的作图纸上作图。计算按照有效数字的运算法则进行，写出主要的计算内容，并求出误差或实验结果的不确定度，正确运用不确定度表示实验结果。

实验结果及讨论：该部分要明确给出实验结果，并对结果进行讨论。实验结果不是简单的测量结果，它包括误差分析或不确定度的评定、分析误差的主要原因和改进方法，还应包括对实验中观察到的现象分析与解释、对实验中有关存在问题的思考及讨论和回答实验思考题等。实验报告中也可写完成该实验的收获和建议（如对实验本身的设计思想、实验仪器的选择和改进等）。

对于课题实验，则应对实验原理的阐述、实验公式的推导、电路或光路的设计、操作步骤的安排、仪器设备的选择、数据结果的讨论等进行比较详尽地探讨。

物理实验虽然是在教师指导下进行的，但在实验中学生不应是完全按照“操作指令”运转的“机器人”，而应积极发挥自己的主观能动性去思考问题，进行观测与分析，探讨最佳实验方案，不断改进实验方法，增强自己的才干和实验技巧。在做物理实验时，我们不是要一个塞满东西的脑袋，而是一个善于分析问题的头脑！我们不仅要有知识，更重要的是将知识转化为能力！

第1章 测量误差、不确定度与数据处理

物理实验的任务不仅是定性地观察物理现象，更重要的是对物理量进行定量地测量，并找出各物理量之间的内在联系。

由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等诸多因素的影响，对一物理量的测量不可能是无限精确的，即测量中的误差是不可避免的。没有测量误差的基本知识，就不可能获得正确的测量值；不会计算测量结果的不确定度就不可能正确表达和评价测量结果；不会处理数据或数据处理方法不当，就得不到正确的实验结果。

本章从实验教学的角度出发，主要介绍测量与误差、误差分析、有效数字、测量结果的不确定度评价等基本知识，这些知识不仅在本课程的实验中要经常用到，而且对于今后从事科学实验也是必须要了解和掌握的。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量及其分类

所谓测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较，得出其倍数的过程。倍数称为待测物理量的数值，选作的计量标准称为单位。因此表示一个被测对象的测量值必须包括数值和单位。

根据测量方式，测量分为直接测量和间接测量。

直接测量是指可从仪器或量具上直接读出待测量大小的测量。例如，用米尺测长度，用温度计测量温度，用电压表测电压，用天平测物体的质量等都属于直接测量。

有些物理量无法进行直接测量，待测量的量值是由若干个直接测量量经过一定的函数关系运算后才获得，这样的测量称为间接测量。例如，测铜柱的密度，是先用米尺直接测得它的高 h 和直径 d ，用天平测得它的质量 m ，然后由关系式 $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ 计算出铜的密度 ρ ，这就是间接测量， ρ 称为间接测量量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展，测量仪器的改进，很多原来只能间接测量的量，现在可以直接测量了，如电能的测量本来是间接测量，现在也可以用电表来进行直接测量。虽然大多数的物理量都是间接测量，但直接测量是一切测量的基础。

根据测量条件是否相同，测量又可分为等精度测量和不等精度测量。

在相同的测量条件下进行的一系列测量称为等精度测量。例如，同一个人，使用同一仪器，采用同样的方法，对同一待测量连续进行多次反复测量，此时应该认为每次测量的可靠程度都相同，故称之为等精度测量，这样的一组测量值称为一个测量列。应该指出：重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程，而不是仅仅为重复读数。

在对某一物理量进行多次测量时,测量条件完全不同或部分不同,则各次测量结果的可靠程度自然也不同的一系列测量称为不等精度测量。例如,在对某一物理量进行多次测量时,选用的测量仪器不同,或测量方法不同,或测量人员不同都属于不等精度测量。处理不等精度测量的结果时,需根据每个测量值的“权重”,进行“加权平均”,因此在一般物理实验中很少采用。

事实上,在实验中,保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的。但当某一条件的变化对结果影响不大时,仍可视这种测量为等精度测量。等精度的误差分析和数据处理比较容易,所以绝大多数物理实验都采用等精度测量。本书所介绍的误差和数据处理知识都是针对等精度测量的。

1.1.2 真值与误差

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不以人的意志为转移的客观量值,称为真值。测量的目的就是要力图得到被测量的真值,但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,只能获得该物理量的近似值。也就是说,一个被测量值 x 与真值 x_0 之间总是存在着差值,这种差值称为测量误差,即

$$\Delta x = x - x_0$$

由测量所得的一切数据,都毫无例外地包含有一定数量的测量误差。没有误差的测量结果是不存在的。测量误差存在于一切测量之中,贯穿于测量过程的始终。随着科学技术水平的不断提高,测量误差可以被控制得越来越小,但是却永远不会降低到零。

从上式我们可以看出,测量误差 Δx 显然有正负之分,因为它是指与真值的差值,常称为绝对误差,为与下面定义的相对误差相区别,这就是老的术语“绝对误差”的来历。注意,不要把绝对误差与测量误差的绝对值相混淆!

绝对误差是一个有量纲的数值,它表示测量值偏离真值的程度。

一般来讲,真值仅是一个理想概念,只有通过完善的测量才能获得。但是,严格的完善难以做到,故真值在很多情况下都难以做到,绝对误差的概念只有理论上的价值。这正是人们放弃难以实际定量操作的“误差”和与绝对误差有关的概念,转而使用不确定度概念的基本原因。

“相对误差”也是我们常常会听到的,它同样也是一个很难定量操作的词。

测量的相对误差定义为测量误差的绝对值与真值的比值,用 E_x 表示

$$E_x = \frac{|\Delta x|}{x_0} \times 100\%$$

相对误差是一个无量纲量,常用百分比来表示测量准确度的高低,因而相对误差有时也称为百分误差,一般保留两位有效数字。

1.1.3 误差的分类

正常测量的误差,按其产生的原因和性质,一般可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。这种划分及其相应的概念,虽然与现在广泛采用的描述测量结果的不确定度概念之间不一定存在简单的对应关系,甚至有些概念可能还是不太严格的,但是作为思维和理解的基础,还是应该有所了解。

1. 系统误差

在相同条件下,多次测量同一物理量时,误差的大小恒定,符号总偏向一方或误差按照某一确定的规律变化,则称其为系统误差。系统误差的来源有以下几个方面。

(1) 仪器误差:由于仪器本身缺陷或没有按照规定条件使用仪器而造成的。如温度计零刻度不在零点,仪器的水平或铅直未调整,天平不等臂等。

(2) 理论误差:由于实验方法本身的不完善或测量所依据的理论公式本身的近似性而造成的。如推导理论公式时没有把散热和吸热考虑在内,称量轻物体的质量时忽略了空气浮力的影响,单摆周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋于零,但实际做不到。

(3) 环境误差:由于环境影响和没有按规定的条件使用仪器引起的,如标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标称值的,若在 30°C 条件下使用,如不加以修正,就引入了系统误差。

(4) 个人误差:由于观测者本人生理或心理特点造成的,如动态滞后、读数有偏大或偏小的习惯等。

系统误差按掌握程度分类,可分为:

(1) 已定系统误差:是指绝对值和符号已经确定,可以估算出的系统误差分量,一般在实验中通过修正测量数据和采用适当的测量方法(如交换法、补偿法、替换法和异号法等)予以消除,如千分尺的零点修正。

(2) 未定系统修正:指符号和绝对值未能确定的系统误差分量,在实验中常用估计误差极限的方法得出(这与后面引出的 B 类不确定度有大致的对应关系)。例如,仪表出厂时的准确度指标是用符号 Δ_{ix} 表示的。它只给出该类仪器误差 Δ_{ix} 的极限范围,但实验者使用该仪器时并不知道该仪器的误差的确切大小和正负,只知道该仪器的准确程度不会超过 Δ_{ix} 的极限。对于未定系统误差,在物理实验中我们一般只考虑测量仪器的(最大)允许误差 Δ_{ix} (简称“仪器误差”)。

系统误差按数值特征或其表现的规律又可分为:

(1) 定值系统误差:这种误差在测量过程中其大小和符号恒定不变。例如,天平砝码的标称值不准确等。

(2) 变值系统误差:这种误差在测量过程中呈现规律性变化。这种变化有的可能随时间而变,有的可能随位置变化。例如,分光计的偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系统误差。

系统误差的特征是具有确定性和方向性,或者都偏大,或者都偏小。系统误差一般应通过校准测量仪器、改进实验装置和实验方案、对测量结果进行修正等方法加以消除或尽可能减小。

系统误差是测量误差的重要组成部分,在任何一项实验工作和具体测量中,最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差,是实验测量工作的主要任务之一,但发现并减小系统误差通常比较困难,需要对整个实验所依据的原理、方法、仪器和步骤等可能引起误差的各种因素进行分析。实验结果是否正确,往往在于系统误差是否已被发现和尽可能消除,因此对系统误差不能轻易放过。

一般而言,对于系统误差可以在实验前对仪器进行校准,对实验方法进行改进等;在实验时采取一定的方法对系统误差进行补偿和消除;实验后对实验结果进行修正等。应预见和分析一切可能产生系统误差的因素,并尽可能减小它们。一个实验结果的优劣,往往就在于系统误差是否已经被发现或尽可能消除。在以后的实验中,对于已定系统误差,要对测量结果进行修正;对于未定系统误差,则尽可能估算出其误差限值,以掌握它对测量结果的影响。我们将在今后实验课中,针对各个实验的具体情况对系统误差进行分析和讨论。

2. 随机误差

在极力消除或修正一切明显的系统误差后,在同一条件下多次测量同一物理量时,测量结果仍会出现一些无规律的起伏。这种在同一量的多次测量过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着的测量误差分量称为随机误差,随机误差有时也称偶然误差。随机误差是实验中各种因素的微小变动引起的,主要包括:

(1) 实验装置的变动性,如仪器精度不高、稳定性差、测量性差、测量示值变动等引起的误差。

(2) 观察者本人在判断和估计读数上的变动性,主要指观察者的生理分辨本领、感官灵敏程度、手的灵活程度及操作熟练程度等带来的误差。

(3) 实验条件和环境因素的变动性,如气流、温度、湿度等微小的、无规则的起伏变化,电压的波动以及杂散电磁场的不规则脉动等引起的误差。

这些因素的共同影响使测量结果围绕测量的平均值发生涨落变化,这一变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现,就某一测量而言是没有规律的,当测量次数足够多时,随机误差服从统计分布规律,可以用统计学方法估算。

3. 粗大误差

实验中,由于实验者操作不当或粗心大意,如看错刻度、读错数字、记错数或计算错误等都会使测量结果明显被歪曲。这种由于错误引起的误差称为粗大误差或过失误差。

由定义可以看出,严格地讲,粗大误差应视为错误,它是通过实验者的主观努力能够克服的。错误不是误差,要及时发现并在数据处理时予以剔除。而系统误差和随机误差是客观的,不可避免的,只能通过实验条件的改善和实验方法的改进予以减小,它们是由客观环境和人的感官的局限决定的。

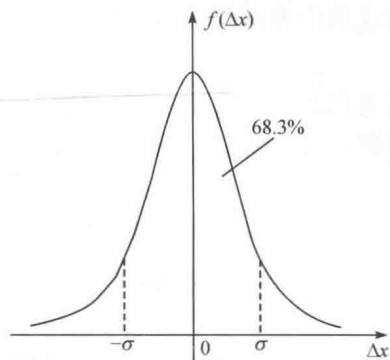


图 1.1-1 随机误差的概率分布

1.1.4 随机误差的分布规律与特性

随机误差的出现,就某一测量来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的。但对同一物理量进行多次测量时,则发现随机误差的出现服从某种统计规律。理论和实践证明,等精度测量中,当测量次数 n 很大时(理论上是 $n \rightarrow \infty$),测量列的随机误差多接近于正态分布(即高斯分布),标准化的正态分布曲线如图 1.1-1 所示。

图中,横坐标 $\Delta x = x_i - x_0$ 表示随机误差,纵坐标表示对应的误差出现的概率密度 $f(\Delta x)$,应用概率论方法可导出

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1.1-1)$$

式中, 特征量 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n}}, \quad n \rightarrow \infty \quad (1.1-2)$$

称为标准误差, 其中 n 为测量次数。

服从正态分布的随机误差具有:

- (1) 单峰性——绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性——绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等。
- (3) 有界性——在一定的测量条件下, 绝对值很大的误差出现的概率等于零。
- (4) 抵偿性——随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋于零, 即

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$ 。也就是说, 若测量误差只有随机误差分量, 即随着测量次数的增加, 测量列的算术平均值越来越趋于真值。因此增加测量次数, 可以减小随机误差的影响。抵偿性是随机误差最本质的特征, 原则上具有抵偿性的误差都可以按照随机误差的方法来处理。

随机误差的大小常用标准误差表示。由概率论可知, 服从正态分布的随机误差落在 $[\Delta x, \Delta x + d(\Delta x)]$ 区间内的概率为 $f(\Delta x)d(\Delta x)$ 。由此可见, 某次测量的随机误差为已确定值的概率为零, 即随机误差只能以确定的概率落在某一区间内。概率密度函数 $f(\Delta x)$ 满足下列归一化条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta x)d(\Delta x) = 1 \quad (1.1-3)$$

所以误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内的概率 P 就是图 1.1-1 中该区间内 $f(\Delta x)$ 曲线下的面积。

$$P(-\sigma < \Delta x < +\sigma) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\Delta x)d(\Delta x) = \int_{-\sigma}^{+\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}\right] d(\Delta x) = 68.3\% \quad (1.1-4)$$

该积分值可由拉普拉斯积分表查得。

标准误差 σ 与各测量值的误差 Δx 有着完全不同的含义。 Δx 是实在的误差值, 而 σ 并不是一个具体的测量误差值, 它反映在相同条件下进行一组测量后, 随机误差出现的概率分布情况, 只具有统计意义, 是一个统计特征量, 其物理意义为代表测量数据和测量误差分布离散程度的特征数。

图 1.1-2 是不同 σ 时的 $f(\Delta x)$ 曲线。 σ 越小, 曲线陡且峰值高, 说明测量值的误差集中, 小误差占优势, 各测量值的分散性小, 重复性好; 反之, σ 值大, 曲线较平坦, 各测量值的分散性较大、重复性差。

式 (1.1-4) 表明, 做任意一次测量, 随机误差落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的概率为 0.683。区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 称为置信区间, 相应的概率称为置信概率。显然, 置信区间扩大, 则置信概率提高。置信区间取 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 、 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 时, 相应的置信概率 $P=95.0\%$ 、 $P=99.7\%$ 。定义 $\delta=3\sigma$ 为极限误差,

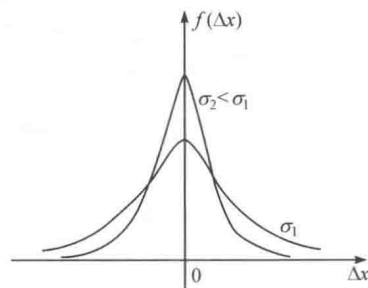
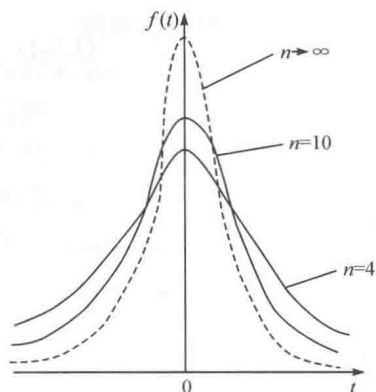


图 1.1-2 不同 σ 时的概率密度曲线

图 1.1-3 t 分布曲线

其概率含义是在 1000 次测量中只有 3 次的测量误差超过 3σ 。由于在一般测量中次数很少超过几十次, 因此可以认为测量误差超过 $\pm 3\sigma$ 范围的概率是很小的, 故称为极限误差, 一般可作为可疑值取舍的判定标准, 也称为剔除坏值标准的 3σ 法则。

然而, 实际测量总是在有限次内进行, 如果测量次数 $n \leq 20$, 误差分布明显偏离正态分布而呈现 t 分布形式。 t 分布函数已算成数表, 可在数学手册中查到, t 分布曲线如图 1.1-3 所示。数理统计中可以证明, $n \rightarrow \infty$ 时, t 分布趋近于正态分布(图 1.1-3 中的虚线对应于正态分布曲线)。由图可见 t 分布比正态分布曲线变低变宽了; n 越小, t 分布越偏离正态分布。但无论哪一种分布形式, 一般都有两个重要的数字特征量, 即算术平均值和标准偏差。

设在某一物理量的 n 次等精度测量中, 得到的测量列为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 各次测量值的随机误差为 $\Delta x_i = x_i - x_0$, 将随机误差相加

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0 \quad \text{或} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_0 \quad (1.1-5)$$

用

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1-6)$$

则式(1.1-5)改写为

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \bar{x} - x_0 \quad (1.1-7)$$

根据随机误差的抵偿特征, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$, 于是

$$\bar{x} \rightarrow x_0 \quad (1.1-8)$$

可见, 当测量次数相当多时, 系统误差忽略不计时的算术平均值 $\bar{x}$ 最接近于真值, 称为测量的最佳值或近真值。我们把测量值与算术平均值之差称为偏差(或残差)

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.1-9)$$

当测量次数 n 有限时, 测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 仍然是真值 x_0 的最佳估计值。证明如下: 假设最佳值为 X 并用其代替真值 x_0 , 各测量值与最佳值间的偏差为 $\Delta x'_i = x_i - X$, 按照最小二乘法原理, 若 X 是真值的最佳估计值, 则要求偏差的平方和最小, 即

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2 \rightarrow \min \quad (1.1-10)$$

由求极值的法则可知, S 对 X 的微商应该等于零

$$\frac{dS}{dX} = 2 \sum_{i=1}^n (x_i - X) = 0 \quad (1.1-11)$$

于是